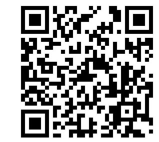
Вестник Донского государственного технического университета. 2020. Т. 20, № 2. С. 170–177. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006
Vestnik of Don State Technical University. 2020. Vol. 20, no. 2, pp. 170–177. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.791 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-2-170-177

Аналитическое определение критериев износостойкости штамповочного инструмента для различных условий нагружения



С. Д. Колотиенко, А. В. Журавлев, Е. В. Рощина
ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Введение. Статья посвящена аналитическому определению общих критериев для прогнозирования износостойкости тяжелонагруженных пар трения, в частности, штамповочного инструмента, работающих при различных условиях нагружения. В основу предложенной системы критериев положены физические зависимости, связывающие основной показатель износостойкости — число циклов нагружения N_F с параметрами трещиностойкости *n* и *C*.
Целями работы являлись разработка и аналитическое обоснование расчетной методики, позволяющей прогнозировать износостойкость штамповочного инструмента для различных условий нагружения, а также создание предпосылок для экспериментального подтверждения эффективности применения разработанной методики.
Материалы и методы. Предложены математические модели, связывающие основной критерий износостойкости — число циклов нагружения N_F с параметрами трещиностойкости *n* и *C*. Проведено аналитическое обоснование предложенных моделей.
Результаты исследования. Разработаны математические модели для прогнозирования износостойкости штамповочного инструмента, работающего в различных условиях нагружения. В частности, для случаев: при трении скольжения и качения инструмента о пластически деформируемый металл, для условий термомеханической контактной усталости, многоцикловой хрупкой контактной повреждаемости, пульсирующего контакта о пластически деформируемый металл, а также для комбинированных разновидностей фрикционного контакта.
Обсуждение и заключения. Полученные результаты могут быть использованы в процессе проектирования и оптимизации конструкций штамповочного инструмента, работающего в различных условиях нагружения, а также при прогнозировании долговечности его работы.

Ключевые слова: штамповочный инструмент, критерии износостойкости, условия нагружения, контактная повреждаемость, трещиностойкость, скольжение, качение, наплавочные материалы.

Образец для цитирования: Колотиенко, С. Д. Аналитическое определение критериев износостойкости штамповочного инструмента для различных условий нагружения / С. Д. Колотиенко, А. В. Журавлев, Е. В. Рощина // Вестник Донского государственного технического университета. — 2020. — Т. 20, №2. — С. 170–177. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-2-170-177



Analytical determination of wear resistance criteria of a stamping tool for various loading conditions

S. D. Kolotienko, A.V. Zhuravlev, E.V. Roshchina
Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Introduction. The paper is devoted to the analytical determination of general criteria for predicting the wear resistance of heavily loaded friction couples, in particular, stamping tools, operating under various loading conditions. The proposed system of criteria is based on physical dependencies that link the basic wear index, i.e. the number of loading cycles N_F with crack resistance parameters *n* and *C*. The work objectives were the development and analytical foundation of the calculation technique that provides for predicting the wear resistance of the stamping tool for various

loading conditions, as well as the predetermination of experimental verification of the efficiency of the developed methodology.
Materials and Methods. Mathematical models that link the key criterion of wear-resistance, the number of loading cycles N_F with crack resistance parameters *n* and *C*, are proposed. An analytical verification of the proposed models is carried out.
Results. Mathematical models are developed for predicting the wear resistance of a stamping tool operating under various loading conditions. In particular, for the following cases: under sliding and rolling friction of the tool on a plastically deformable metal, for conditions of thermo-mechanical contact fatigue, for high-cycle brittle contact damaging, for pulsating contact on a plastically deformable metal, as well as for combined types of frictional contact.
Discussion and Conclusions. The results obtained can be used in the design and structural optimization of the stamping tool operating under various loading conditions, as well as in predicting its life cycle.

Keywords: stamping tool, wear resistance criteria, loading conditions, contact damaging, crack resistance, sliding, rolling, surfacing materials.

For citation: S. D. Kolotienko, A.V. Zhuravlev, E.V. Roshchina. Analytical determination of wear resistance criteria of a stamping tool for various loading conditions. Vestnik of DSTU, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 170–177. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-2-170-177

Введение. Экспериментальные и теоретические исследования процессов изнашивания наплавочных материалов свидетельствуют, что никакие свойства материала в отдельности не определяют однозначно износостойкость в условиях экстремального характера фрикционного контакта. Только определенный комплекс физико-механических свойств с учетом особенностей фрикционного взаимодействия должен учитываться при определении износостойкости наплавочных материалов.

Критерии износостойкости должны отвечать условиям конкретных трибосопряжений. Для определения критериев следует придерживаться в каждом отдельном случае единого подхода. Очевидно, что при всех явлениях и разновидностях контактной повреждаемости следует учитывать главное условие: тот материал считается более износостойким, у которого более длительна стадия роста усталостных трещин. Таким образом, критерий износостойкости должен учитывать продолжительность процесса разрушения поверхностного слоя и отделения первой частицы износа. В этом случае определение критерия износостойкости сводится к определению числа циклов N_F, при котором происходит разрушение поверхностного слоя.

В этом случае назначение критериев износостойкости может состоять не в расчете контактной выносливости материалов, а в сравнении и подборе наплавочных материалов для конкретных условий фрикционного контакта, характерных для тяжелонагруженных пар трения. Таким образом, критерии должны обеспечивать адекватность рядов износостойкости для конкретных разновидностей фрикционных контактов.

В соответствии с единым подходом при определении критериев обходимо учитывать следующие основные положения. Во всех видах фрикционного контакта следует рассматривать один тип трещины. В общем случае обязательно должны учитываться параметры трещиностойкости материалов, которые определяют кинетику процессов развития усталостных микротрещин. При сравнении наплавочных материалов между собой по критериям обязательно необходимо учитывать возможность развития конкурирующего вида износа — малоцикловой вязкой повреждаемости в результате лепесткового отслаивания.

Материалы и методы. Для условий реверсивного скольжения о пластически деформируемый металл автором впервые был предложен метод анализа износостойкости с учетом основных свойств материала, которые определяют процесс разрушения поверхностного слоя при трении [1].

Оказалось возможным определить критерий износостойкости с учетом вязкости разрушения, предела текучести, коэффициента трения, размеров исходных трещин. Как показывают исследования [2–9, 11, 13, 15, 16], данный подход является перспективным и для других условий фрикционного контакта, характерных для тяжелонагруженных пар трения, в том числе штамповочного инструмента.

В. В. Рубанов, исходя из критерия, предложенного для реверсивного скольжения в работе [1], и используя зависимость предела текучести от ряда характеристик структуры материала, предложил определять износостойкость материала по критерию [4]:

$$K_и = \frac{\left(\sigma_м l_i + 11Gb\dfrac{\phi}{1-\phi}\right)\cdot K_{1c}}{f^2 l_i^{3/2}}, \quad (1)$$

где $\sigma_м$ — предельное механическое напряжение в материале от действия матрицы, при котором происходит

его разрушение; l_i — средний размер дефекта; K_{1c}— вязкость разрушения; φ — объемная доля дефектов; G — модуль сдвига; b — вектор Бюргерса; f — коэффициент трения (здесь и далее применяется коэффициент трения на основе закона Зибеля).

Учитывая, что для ряда сплавов существует зависимость K_{1c} от предела прочности при изгибе $\sigma_{изг}$, после ряда упрощений В. В. Рубанов рекомендует для оценки износостойкости наплавочных материалов критерий:

$$K_и = \frac{G \cdot \phi \cdot \sigma_{изг}}{f^2 \cdot (1-\phi) \cdot l_i^{3/2}} . \quad (2)$$

Данный подход имеет ограниченные возможности, так как предложенный критерий является общим для различных схем фрикционного контакта и при определении износостойкости наплавочных материалов для скольжения и качения по критерию (2) не учитываются различия в механизме контактной повреждаемости, в условиях контактного взаимодействия для скольжения и качения с тангенциальным усилием или без него.

Критерий износостойкости (2) не учитывает параметры трещиностойкости материалов, которые непосредственным образом влияют на скорость развития усталостных микротрещин, а, следовательно, определяют длительность процессов контактной повреждаемости.

Результаты исследования. При аналитическом определении критериев износостойкости следует принять основное допущение: поле контактных растягивающих напряжений однородно, а его величина равна максимальному значению, которое определяется на поверхности. Таким образом, данное допущение не учитывает постепенного затухания растягивающих напряжений в глубине материала и является более жесткой оценкой. Как показали исследования [10], возникающие при этом погрешности невелики, если длина трещин меньше глубины расположения зоны сжимающих напряжений.

Задача определения критериев износостойкости материалов, изнашивающихся в условиях контактной повреждаемости, состоит в следующем. Необходимо аналитически определить длительность (число циклов контактного взаимодействия) процесса отделения частицы износа недопустимых размеров. В связи с этим в качестве растягивающих напряжений следует использовать те, которые в конкретном фрикционном контакте воздействуют на трещину.

Учитывая различия между малоцикловой хрупкой контактной повреждаемостью и многоцикловой повреждаемостью, задача определения критериев износостойкости разбивается на два типа. В первом случае для малоцикловой хрупкой контактной повреждаемости при определении длительности процесса контактного разрушения следует учитывать возможность достижения трещины критического значения. Во втором случае для малоцикловой хрупкой контактной повреждаемости, как установлено, трещины не достигают критических значений (l_c>>l_i). В этом варианте возможен случай использования в качестве конечной длины трещины предельно допустимой величины размера выкрашивания (устанавливается либо из требований допуска на износ трибосопряжения, либо из требований ограничения размера контактных повреждений на кромке рабочей поверхности).

Критерий износостойкости для скольжения о пластически деформируемый металл

Длительность процесса контактного разрушения определяется интегрированием уравнения Пэриса [17]. В качестве величины растягивающих напряжений для этого случая фрикционного контакта следует взять [10]:

$$\sigma_{p\max} = \frac{4pf}{\pi} , \quad (3)$$

где p — среднее давление в контакте.

В этом случае выражение для коэффициента интенсивности напряжений примет вид:

$$\sigma_{p\max} = \frac{4pf}{\sqrt{\pi}} \sqrt{l} . \quad (4)$$

Длительность процесса разрушения, а, следовательно, и критерий износостойкости N_F, определится как

$$N_F = \int_{l_i}^{l_k} \frac{dl}{CK^n l^{n/2}} = \frac{\pi^{n/2}}{C\left(4pf\right)} \int_{l_i}^{l_k} \frac{dl}{l^{n/2}} . \quad (5)$$

При n≠ 2 решение выражения (5) примет вид

$$N_F = \frac{2\pi^{n/2}}{(n-2)C(4pf)^n} \left(\frac{1}{l_i^{\frac{n-2}{2}}} - \frac{1}{l_c^{\frac{n-2}{2}}} \right). \quad (6)$$

Из основных положений механики разрушения известно, что критическая длина трещины, это

величина, при достижении которой трещина начинает закритическое самопроизвольное движение. Данный момент однозначно определяет вязкость разрушения материала K_{1C}. В случае контактного нагружения однородным полем напряжений при скольжении значение критической длины трещины может быть определено из выражения [10]:

$$l_c = \frac{\pi}{16p^2 f^2} K_{1c}^{f^2} . \quad (7)$$

После соответствующей замены и преобразований, получим

$$N_F = \frac{2\pi^{n/2}}{(n-2)C(4pf)^n} \left[\frac{1}{l_i^{\frac{n-2}{2}}} - \left(\frac{4pf}{\pi^{1/2} K_{1C}^f} \right)^{n-2} \right]. \quad (8)$$

Данное выражение можно использовать в качестве критерия износостойкости при скольжении о пластически деформируемый металл в условиях высоких контактных давлений, когда реализуется малоцикловая хрупкая контактная повреждаемость. В этом случае, как следует из выражения (7), износостойкость наплавочных материалов определяется контактным давлением, коэффициентом трения, вязкостью разрушения, размерами дефектов структуры и параметрами трещиностойкости n и C.

Критерий износостойкости для термомеханической контактной усталости

Воздействие на поверхность трения циклов нагрев-охлаждение, характерное прежде всего для пульсирующего контакта о нагретый пластически деформируемый металл, приводит к возникновению в поверхностном слое периодических термомеханических напряжений. Известно выражение В. И. Духовченко [12] для определения этого вида напряжений:

$$\sigma = \frac{\alpha E \Delta T}{1-v} , \quad (9)$$

где α — температурный коэффициент линейного расширения; E — модуль упругости; ΔT — температурный перепад цикла «нагрев-охлаждение»; v — коэффициент Пуассона.

С учетом выражения (9), решение интеграла для уравнения Пэриса при $n \neq 2$ в этом случае будет определяться по формуле:

$$N_F = \frac{2(1-v)^n}{(n-2)C\pi^{n/2}(\alpha E \Delta T)^n} \left(\frac{1}{l_i^{\frac{n-2}{2}}} - \frac{1}{b^{\frac{n-2}{2}}} \right). \quad (10)$$

В случае принятия за l_c предельного значения $b_{\max}$, которое назначается в качестве допуска на предельный размер очага выкрашивания кромки рабочей поверхности, получим

$$N_F = \frac{2(1-v)^n}{(n-2)C\pi^{n/2}(\alpha E \Delta T)^n} \left(\frac{1}{l_i^{\frac{n-2}{2}}} - \frac{1}{b_{\max}^{\frac{n-2}{2}}} \right) \quad (11)$$

или

$$N_F = \frac{2(1-v)^n \left(b_{\max}^{\frac{n-2}{2}} - l_i^{\frac{n-2}{2}} \right)}{(n-2)C\pi^{n/2}(\alpha E \Delta T)^n l_i^{\frac{n-2}{2}} b_{\max}^{\frac{n-2}{2}}} \quad (12)$$

Данное выражение может быть использовано в качестве критерия износостойкости наплавочных материалов при термомеханической усталости. Износостойкость материалов в этих условиях также зависит от параметров трещиностойкости n и C, определяется величиной допуска на единичное выкрашивание, модулем упругости, коэффициентом Пуассона и обратно пропорциональна коэффициенту теплового расширения, величине температурного перепада и размеру исходных дефектов.

Критерии износостойкости для многоцикловой хрупкой контактной повреждаемости

Учитывая в качестве $l_1 = l_i$ и принимая во внимание, что при качении с тангенциальным усилием и упругом пульсирующем контакте угол развития трещин не зависит от свойств материала и близок к 45°, для определения длительности процесса разрушения при качении с тангенциальным усилием получено выражение:

$$N_F = \frac{2}{(n-2)C} \left[\frac{7,35}{(1+11f)\sigma_{z\max}} \right]^n \left(\frac{1}{l_i^{\frac{n-2}{2}}} - \frac{1}{l_c^{\frac{n-2}{2}}} \right). \quad (13)$$

Для качения без тангенциального усилия

$$N_F = \frac{2}{(n-2)C}\left[\frac{4,62}{\sigma_{z\max}}\right]^n \left(\frac{1}{l_i^{\frac{n-2}{2}}} - \frac{1}{l_c^{\frac{n-2}{2}}}\right), \tag{14}$$

При пульсирующем контакте

$$N_F = \frac{2}{(n-2)C}\left[\frac{6,65}{\sigma_{z\max}}\right]^n \left(\frac{1}{l_i^{\frac{n-2}{2}}} - \frac{1}{l_c^{\frac{n-2}{2}}}\right). \tag{15}$$

Так как в условиях многоцикловой хрупкой контактной повреждаемости трещины при развитии не достигают критического значения, $l_c >> l_i$, то выражения (13)–(15) можно преобразовать следующим образом:

– для качения с тангенциальным усилием

$$N_F = \frac{2\cdot 7,35^n}{(n-2)C(1+11f)^n \sigma_{z\max}^n l_i^{\frac{n-2}{2}}}. \tag{16}$$

– для качения без тангенциального усилия

$$N_F = \frac{2\cdot 4,62^n}{(n-2)C\sigma_{z\max}^n l_i^{\frac{n-2}{2}}}, \tag{17}$$

– для пульсирующего контакта

$$N_F = \frac{2\cdot 6,65^n}{(n-2)C\sigma_{z\max}^n l_i^{\frac{n-2}{2}}}, \tag{18}$$

Полученные критерии износостойкости свидетельствуют о том, что и в этом случае определяющее влияние оказывают параметры трещиностойкости материалов n и C, размер дефектов, а, кроме того, в случае качения с тангенциальным усилием, следует учитывать коэффициент трения.

Критерий износостойкости для качения о пластически деформируемый металл

Особенность этой разновидности фрикционного контакта состоит в том, что контртело приобретает интенсивную пластическую деформацию. В этом случае напряжения в зоне контакта не могут оцениваться в соответствии с формулами для упругого контакта и критерии износостойкости (16)–(18) неприменимы.

Для решения данной задачи воспользуемся аналогией для качения о пластически деформируемый металл и скольжения в этих же условиях. Тогда на трещину будет периодически воздействовать пластически деформируемое катящееся тело. Учитывая, что качение в этих условиях сопровождается значительным проскальзыванием, воспользуемся выражением (6) для контакта скольжения. В качестве конечной длины трещины следует использовать величину предельного допуска на единичное выкрашивание кромки рабочей поверхности.

В этом случае число циклов для разрушения поверхностного слоя можно определить через выражение:

$$N_F = \frac{2\pi^{n/2}}{(n-2)C(4pf)^n}\left(\frac{1}{l_i^{\frac{n-2}{2}}} - \frac{1}{b_{\max}^{\frac{n-2}{2}}}\right). \tag{19}$$

После преобразований выражение (19) можно переписать следующим образом:

$$N_F = \frac{2\pi^{n/2}\left(b_{\max}^{\frac{n-2}{2}} - l_i^{\frac{n-2}{2}}\right)}{(n-2)C(4pf)^n l_i^{\frac{n-2}{2}} b_{\max}^{\frac{n-2}{2}}}. \tag{20}$$

Таким образом, износостойкость наплавочных материалов при качении о пластически деформируемый металл определяется параметрами трещиностойкости n и C, контактным давлением, коэффициентом трения, предельным допуском на размер очага выкрашивания и размерами исходных дефектов.

Критерий износостойкости для пульсирующего контакта о пластически деформируемый металл

Характерными чертами этого вида фрикционного контакта являются чрезвычайно высокие контактные давления (до 4000 МПа), что связано с динамическим характером приложения контактной нагрузки. В этом случае также невозможно воспользоваться выражением (18) для упругого пульсирующего контакта.

За максимальные растягивающие напряжения, действующие на трещину примем величину, которую

при первом приближении можно определить исходя из условия $\sigma_{z\max} \approx p$ по формуле:

$$\sigma_{p\max} = \frac{1-2\nu}{3} p \tag{21}$$

где p — средняя величина контактного давления.

Длительность процесса разрушения определяется интегрированием уравнения Пэриса для данных условий контактного нагружения:

$$N_F = \int_{l_i}^{l_c} \frac{dl}{CK^n l^{n/2}} = \frac{3^n}{C\pi^{n/2}(1-2\nu)^n p^n} \int_{l_i}^{l_c} \frac{dl}{l^{n/2}} = \frac{2\cdot 3^n}{(n-2)\pi^{n/2}C(1-2\nu)^n p^n}\left(\frac{1}{l_i^{\frac{n-2}{2}}} - \frac{1}{l_c^{\frac{n-2}{2}}}\right). \tag{22}$$

Представим значение критической длины трещины l_c через K_{1c}^f:

$$l_c = \frac{K_{1c}^f}{\pi\left(\frac{1-2\nu}{3} p\right)^2} \tag{23}$$

и после преобразований получим:

$$N_F = \frac{2\cdot 3^n}{(n-2)\pi^{n/2}C(1-2\nu)^n p^n}\left[\frac{1}{l_i^{\frac{n-2}{2}}} - \left(\frac{\pi^{1/2}(1-2\nu)p}{3K_{1c}^f}\right)^{n-2}\right]. \tag{24}$$

Данное выражение представляет собой критерий износостойкости наплавочных материалов для пульсирующего контакта о пластически деформируемый металл. В этих условиях износостойкость определяется вязкостью разрушения, параметрами трещиностойкости, коэффициентом Пуассона, контактным давлением и размерами начальных дефектов.

Критерии износостойкости для комбинированных разновидностей фрикционного контакта

В условиях трения скольжения о нагретый пластически деформируемый металл рабочая поверхность инструмента подвергается поочередному воздействию напряжений от сил трения и термомеханических напряжений. В соответствии с гипотезой о линейном суммировании напряжений коэффициент интенсивности напряжений с учетом выражений (3) и (4) в этом случае можно представить в виде:

$$K = \sigma_{общ}\sqrt{\pi l} = \left(\frac{4pf}{\pi} + \frac{\alpha E\Delta T}{1-\nu}\right)\sqrt{\pi l}\ . \tag{25}$$

Тогда интегрированием уравнения Пэриса можно получить выражение для определения необходимого для разрушения числа циклов:

$$N_F = \int_{l_i}^{l_c} \frac{dl}{C\left(\frac{4pf}{\pi} + \frac{\alpha E\Delta T}{1-\nu}\right)^n \sqrt{\pi l}} = \frac{2}{\pi^{1/2}(n-2)C\left(\frac{4pf}{\pi} + \frac{\alpha E\Delta T}{1-\nu}\right)^n}\left(\frac{1}{l_i^{\frac{n-2}{2}}} - \frac{1}{l_c^{\frac{n-2}{2}}}\right). \tag{26}$$

Критическую длину трещины можно определить из выражения (25) имея в виду, что момент закритического разрушения наступит при $K = K_{1c}^f$. Тогда

$$l_c = \frac{K_{1c}^f}{\pi\left(\frac{4pf}{\pi} + \frac{\alpha E\Delta T}{1-\nu}\right)^2}\ . \tag{27}$$

Подставляя значение l_c в уравнение (26), можно получить выражение для критерия износостойкости в случае комбинированного воздействия на поверхность трения скольжения и термомеханических напряжений:

$$N_F = \frac{2}{\pi^{1/2}(n-2)C\left(\frac{4pf}{\pi} + \frac{\alpha E\Delta T}{1-\nu}\right)^n}\left(\frac{1}{l_i^{\frac{n-2}{2}}} - \frac{\pi^{\frac{n-2}{2}}\left(\frac{4pf}{\pi} + \frac{\alpha E\Delta T}{1-\nu}\right)^{n-2}}{K_{1c}^{f(n-2)}}\right). \tag{28}$$

Комбинированное воздействие на поверхность трения возможно при упругом пульсирующем контакте с наложением термомеханических напряжений. В этом случае уравнение (18) следует записать в виде:

$$N_F = \frac{2}{(n-2)C}\left(\frac{6,65}{\sigma_{z\max} + \frac{\alpha E\Delta T}{1-\nu}}\right)^n \left(\frac{1}{l_i^{\frac{n-2}{2}}} - \frac{1}{l_c^{\frac{n-2}{2}}}\right). \tag{29}$$

Учитывая, что в этом варианте нагружения l_c>>l_i, получим выражение для критерия износостойкости при упругом пульсирующем контакте с термомеханической усталостью

$$N_F = \frac{2 \cdot 6{,}65^n}{(n-2)C\left(\sigma_{z\max} + \frac{\alpha E \Delta T}{1-\nu}\right)^n l_i^{\frac{n-2}{2}}}. \quad (30)$$

Обсуждение и заключения. Получены аналитические зависимости для расчета показателя износостойкости N_F для различных условий работы штамповочного инструмента на основе общих критериев, описывающих параметры трещиностойкости материалов *n* и *C*. Полученные результаты могут быть использованы в процессе проектирования и оптимизации конструкций штамповочного инструмента, работающего в различных условиях нагружения, а также при прогнозировании долговечности его работы.

Библиографический список

1. Колотиенко, С. Д. Критерий контактной выносливости наплавочных материалов при качении / С. Д. Колотиенко, Л. В. Красниченко, А. М. Дидовец // Теория и практика создания, испытания и эксплуатации триботехнических систем : сб. науч. трудов Всесоюзной научно-техн. конф. — Москва, 1986. — С. 235–236.

2. Рубанов, В. В. Исследование износостойкости наплавочных материалов при трении о пластически деформируемый металл / В. В. Рубанов, С. Д. Колотиенко // Современные методы наплавки и наплавочные материалы : сб. науч. трудов Всесоюзной научно-техн. конф. — Харьков, 1981. — С. 103–104.

3. Рубанов, В. В. Износостойкость наплавочных материалов при качении / В. К. Рубанов, С. Д. Колотиенко, А. М. Дидовец. — Деп. ВНИИТЭМР, 18.08.94. №249.

4. Рубанов, В. В. Критерии износостойкости наплавочных материалов в условиях тяжелого нагружения / В. В. Рубанов, К. Паства, М. М. Денищенко // Механика. — Познань, 1991. — № 36. — С.119–124.

5. Рубанов, В. В. Критерий износостойкости наплавочных твердых сплавов / В. В. Рубанов // Вестник Донского государственного технического университета. — 2006. — Т.6. — №3 (30). — С. 224–227.

6. Рубанов, В. В. Изнашивание наплавочных материалов при трении скольжения о пластически деформируемый металл / В. В. Рубанов, С. Д. Колотиенко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. — 2016. — №2(53). — С. 201–206.

7. Колотиенко, С. Д. Контактная выносливость наплавочных материалов при качении / С. Д. Колотиенко, А. М. Дидовец, А. Л. Пивоваров // Применение новых материалов в сельскохозяйственном машиностроении : сб. науч. трудов Всесоюзной научно-техн. конф. — Ростов-на-Дону, 1985. — С. 56–60.

8. Колотиенко, С. Д. Анализ процесса контактного разрушения при трении качения о пластически деформируемый материал. / С. Д. Колотиенко, А. М. Дидовец, А. Л. Пивоваров // Оптимизация и интенсификация процессов отделочно-зачистной упрочняющей обработки : сб. науч. трудов Всесоюзной научно-техн. конф. — Ростов-на-Дону, 1986. —С. 103–105.

9. Колотиенко, С. Д. Исследование контактной выносливости наплавочных материалов при качении. / С. Д. Колотиенко, А. М. Дидовец, А. Л. Пивоваров // Совершенствование процессов отделочно-упрочняющей обработки деталей : сб. науч. трудов Всесоюзной научно-техн. конф. — Ростов-на-Дону, 1986. — С. 114–118.

10. Колотиенко, С. Д. Исследование изнашивания наплавочных твердых сплавов при реверсивном трении о пластически деформируемый металл. Дис. … канд. техн. наук / С. Д. Колотиенко. — Ростов-на-Дону, 1978. — 210 с.

11. Колотиенко, С. Д. Механизм изнашивания литых твердых сплавов в тяжелонагруженных парах трения / С. Д. Колотиенко, В. В. Рубанов, Ю. А. Гордин // Вестник Донского государственного технического университета. — 2003. — Т.3, №3 (17). — С.5–16.

12. Духовченко, В. И. Исследование термонагруженного состояния и разработка инструмента для горячей штамповки осесимметричных деталей : дис. … канд. техн. наук / В. И. Духовченко. — Краматорск, 1982. — 210 с.

13. Сулейманов, В. Н. Исследование изнашивания и повышения износостойкости тяжелонагруженных кулаков кузнечнопрессовых машин, работающих в условиях трения качения: дис. … канд. тех. наук / В. Н. Сулейманов. — Ростов-на-Дону, 1978. — 150 с.

14. Рубанов, В. В. Установка для исследования изнашивания наплавочных материалов при трении качения / В. В. Рубанов, С. Д. Колотиенко // Вестник Донского государственного технического университета. — 2011. — Т. 11, № 9(60). — С.1646–1650.

15. Нетягов, П. Д. Исследование триботехнических характеристик металлических покрытий, нанесенных наплавкой, электродуговым и плазменным напылением // П. Д. Нетягов [и др.] // Трение и износ. — 1989. — Т.10, №5. — С. 909–913.

16. Щипачев, А. М. Определение предела выносливости с учетом параметров качества поверхностного слоя / А. М. Щипачев, В. С. Мухин // Известия вузов. Авиационная техника. — 1999. — № 3. — С. 23–25.

17. Крагельский, И. В. Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин,

В. С. Комбалов // Машиностроение. — Москва. — 1977. — 526 с.

18. Колотиенко, С. Д. Расчетно-экспериментальные методы прогнозирования выносливости наплавочных материалов / С. Д. Колотиенко, А. В. Журавлев, Е. В. Рощина // Молодой исследователь Дона : [сайт] — 2019, № 3(18). — С. 36–42. — URL: http://mid-journal.ru/upload/iblock/625/8_Kolotienko_36_42.pdf.

19. Саврай, Р. А. Контактная выносливость NiCrBSi покрытий, полученных методом газопорошковой лазерной наплавки / Р. А. Саврай [и др.] // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). — 2014. — №4. — С. 43–51.

20. Степнов, М. Н. Прогнозирование характеристик сопротивления усталости материалов и элементов конструкций / М. Н. Степнов, А. В. Зинин. — Москва : Инновационное машиностроение, 2016. —392 с.

21. Бисерикан, М. В. Экспериментальное исследование усталостной долговечности вагонного колеса повышенной твердости при взаимодействии с рельсом / М. В. Бисерикан, С. В. Петроченко, К. В. Аверков // Омский научный вестник. — 2019. — № 2(164). — С. 18–22.

22. Гучинский, Р. В. Прогнозирование усталостной долговечности металлов с учетом неоднородности микроструктуры / Р. В. Гучинский, С. В. Петинов, Ш. Сиддик, М. Имран, Ф. Вальтер // Научно-технические ведомости СПГПУ. — 2015, № 4(231). — С.134–143.

23. Махутов, Н. А. Закономерности накопления малоцикловых повреждений с учетом эксплуатационных параметров процесса нагружения / Н. А. Махутов, М. М. Гаденин // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. — 2019, № 56. — С. 45–57.

24. Махутов, Н. А. Локальные критерии прочности, ресурса и живучести авиационных конструкций / Н. А. Махутов, М. М. Гаденин, В. В. Москвичев [и др.]. — Новосибирск : Наука, 2017. — 600 с.

25. Прис, Н. М. Оценка усталостной долговечности при действии ступенчатого нагружения / Н. М. Прис, А. В. Безменова / Технические науки — от теории к практике : сб. трудов L междунар. научно-практ. конф. — 2015, № 9 (45). — С.34–40.

26. Воробьев, А. А. Методика расчета размера контактно-усталостных повреждений железнодорожного колеса по результатам, полученным на модельных роликах /А. А. Воробьев, И. В. Федоров, И. А. Иванов [и др.] // Бюллетень результатов научных исследований. — 2018, № 1. — С. 18–24.

Сдана в редакцию 04.03.2020
Запланирована в номер 28.04.2020

Об авторах:

Колотиенко Сергей Дмитриевич, заведующий кафедрой «Технология конструкционных материалов», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ScopusID 7801633282, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6724-5131, spu-47.4@donstu.ru

Журавлев Андрей Владимирович, доцент кафедры «Технология конструкционных материалов», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доцент, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9009-1844, awj2001@yandex.ru

Рощина Евгения Валерьевна, магистрант кафедры «Технология конструкционных материалов», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5729-4191, ev_roschina@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

С. Д. Колотиенко — научное руководство, формирование основной концепции, постановка цели и задач исследования; А. В. Журавлев — проведение расчетов, анализ результатов исследований, подготовка текста, формирование выводов; Е. В. Рощина — доработка и окончательная корректировка и выводов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.